

Bilan énergétique d'une opération de séchage et pistes de réduction

Aziz Lagdhir Ph.D.
Chercheur en science du bois

**Ateliers-Conférences
sur le séchage du bois
23-24 avril 2026**

Plan de la présentation

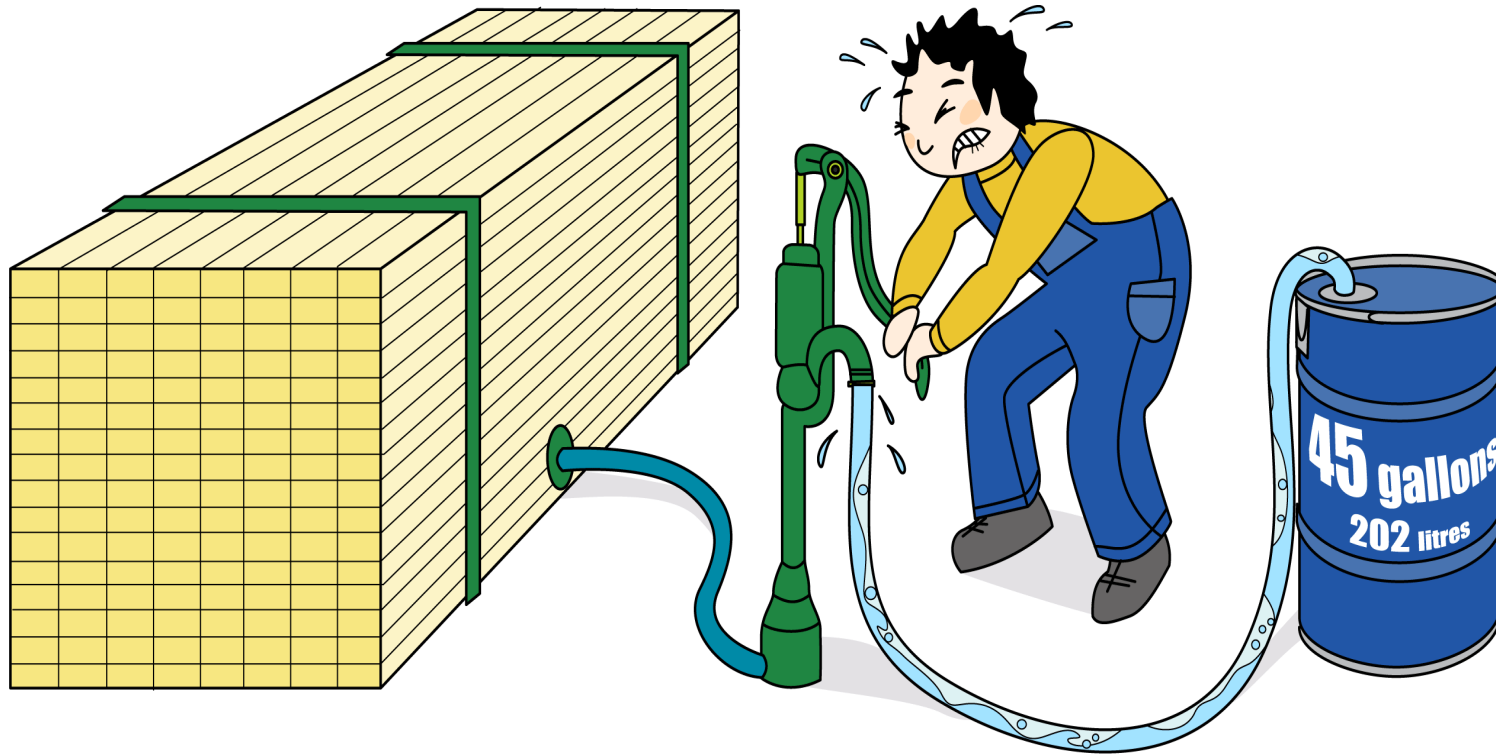


- Introduction et mise en contexte
- Objectifs et motivation de la démarche
- Composantes du bilan énergétiques du séchage
- Quelques pistes de réflexion pour réduire la consommation énergétique

Introduction – Mise en contexte

- Les coûts de séchage sont directement liés aux coûts de l'énergie (60 à 70 % de l'énergie totale consommée).
- Les prix de l'énergie sont actuellement en hausse
- Même avec des sources thermiques moins coûteuses que l'électricité, le coût énergétique du séchage est loin d'être négligeable
- Les pressions environnementales poussent l'industrie à réduire sa consommation énergétique
- Pour le séchage de sapin, ceci peut représenter l'équivalent de quelques **300 kWh/m³** de bois séché, soit un coût d'environ **\$21/m³** si l'électricité est la seule source d'énergie.

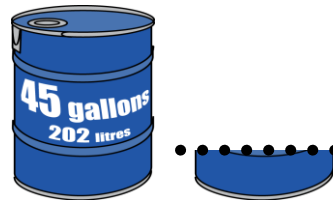
Quantité d'eau à extraire !



Combien d'eau faut-il extraire de 1 Mpmp
de 2"x 4"x 8' (188 morceaux) ???

Quantité d'eau à extraire !

- Épinette noire (EPN)
(45 % - 15 %)



1,2

- Sapin baumier (SAB)
(100 % - 15 %)



2,8

- Pin blanc (PIB)
(90 % - 7 %)



2,9

- Peuplier faux-tremble (PET)
(110 % - 15 %)



3,4

Quantité d'énergie requise !

Sapin baumier (SAB) : 100 Mpmp (2"x 4"x 8')
(H : 100 % → 15 %)



280 gallons
d'eau

56 000 kg (H₂O) → 1,09 kWh/kg (H₂O)

61 040 kWh
(20 600 000 BTU)

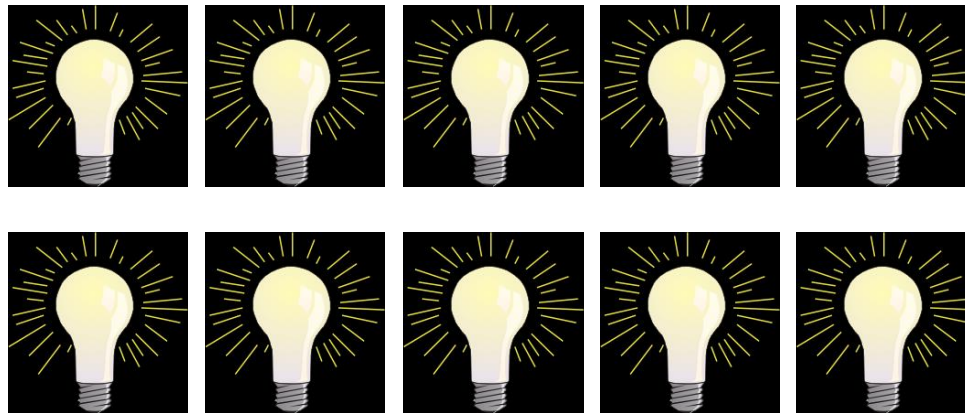
N.B. 1 kWh= 3 421 BTU

Quelle est la quantité d'énergie requise
pour extraire l'eau ???

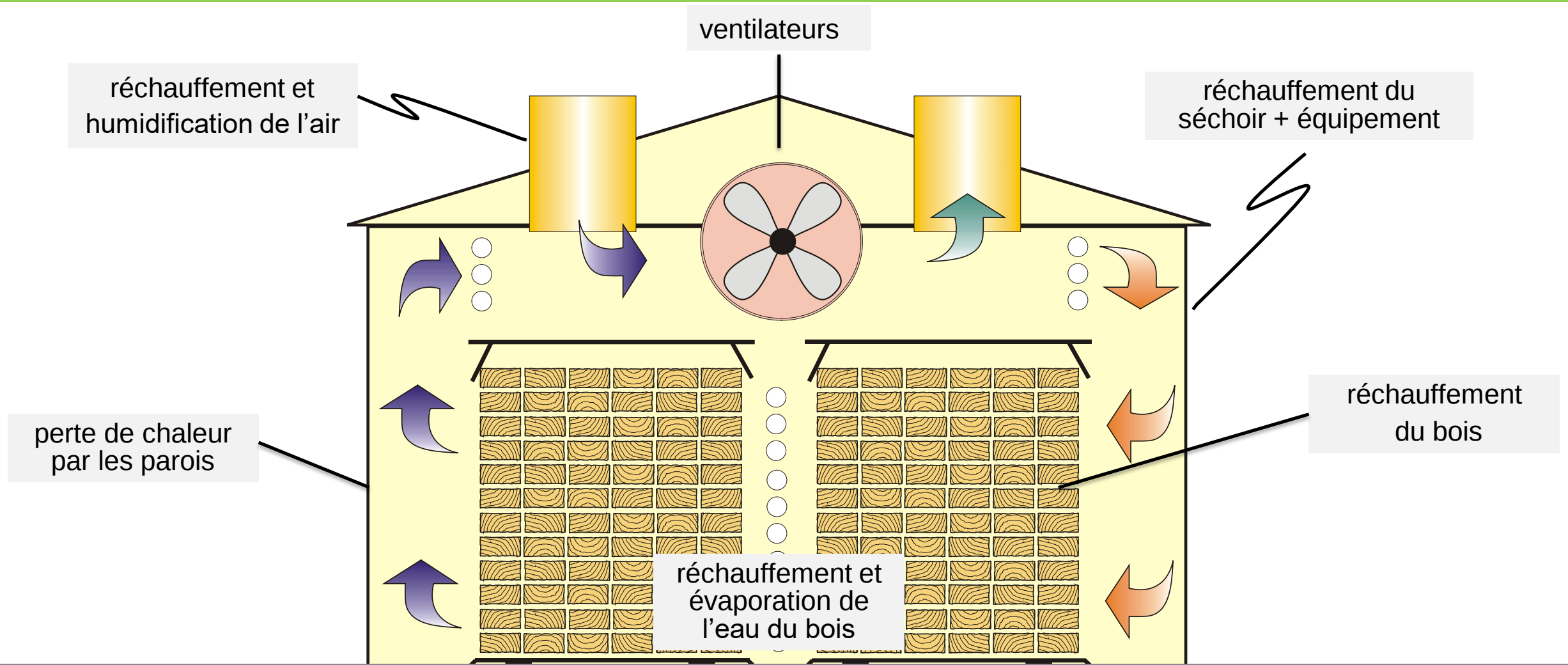


Que représente 1 kWh ?

10 ampoules de 100 W qui fonctionnent pendant 1 heure



Composantes de la consommation d'énergie au séchoir



Approche de calcul de la consommation énergétique au séchoir

La consommation énergétique au séchoir se divise en deux catégories :

- consommation d'énergie électrique

Elle représente normalement l'énergie requise pour le fonctionnement des ventilateurs

ex. : installation de séchage muni d'un compteur électrique séparé du reste de l'usine. La consommation d'énergie électrique est alors obtenue directement de la facture d'électricité

- consommation d'énergie calorifique ou thermique

Deux méthodes de calcul sont possibles :

méthode de l'efficacité thermique

méthode du bilan énergétique

Approche de calcul de la consommation énergétique au séchoir

La consommation énergétique au séchoir est la sommation des divers postes de consommation d'énergie dans un séchoir :

- Q1 : réchauffement de la matière ligneuse anhydre (débits, baguettes, et traverses de support)
- Q2 : réchauffement du séchoir et des équipements connexes
- Q3 : énergie requise pour vaincre les forces de rétention de l'eau dans le bois (i.e. pour le "décrochement" de l'eau du bois)
- Q4 : réchauffement de l'eau résiduelle dans le bois après le séchage
- Q5 : réchauffement et évaporation de l'eau extraite
- Q6 : réchauffement et humidification de l'air de séchage
- Q7 : pertes thermiques à travers les parois et le plancher du séchoir
- Q8 : énergie requise pour le fonctionnement des ventilateurs

Approche de calcul de la consommation énergétique au séchoir

La feuille de calcul du bilan énergétique est développée sur le **logiciel Excel**

Elle permet le calcul de la consommation énergétique liée à chaque poste de consommation d'énergie en cours d'une opération de séchage (Q_i)

Elle tient compte de la saison, été ou hiver

Son fonctionnement consiste à saisir les données initiales associées à :

Données de base du séchoir et du chargement

Humidité initiale et finale

Conditions de l'air extérieur

Programme de séchage

Courbe de séchage (perte d'eau par étape)

Données pour le calcul de la consommation énergétique Qi

Espèce	Épinette noire
Type de débit	2" x 4" x 8'
Masse volumique basale	410 kg/m³
Teneur en humidité initiale	45%
Teneur en humidité finale	13%
Température du bois initiale	-13 °C (hiver) et 18 °C (été)

**Données de base
relatives au matériel à
sécher**

Dimensions des paquets	4' x 4' x 8' (1,22 x 1,22 x 2,44 m)
Nombre de paquets dans le séchoir	144
Espacement latéral entre les colombages	3 mm
Type de paquet	20 rangées; 12 morceaux par rangée
Mode d'empilement	4 paquets en largeur, 3 en hauteur et 12 paquets en longueur
Nombre de baguettes par paquet	105
Dimensions des baguettes	19 mm x 38 mm x 1220 mm
Masse volumique des baguettes	410 kg/m³
Coefficient de remplissage du séchoir	100%

**Données relatives aux
paquets, baguettes et
traverses**

Données pour le calcul de la consommation énergétique Q_i

Dimensions	6,5 m de hauteur x 9 m de largeur x 32 m de longueur
Capacité (colombages de 2" d'épaisseur)	440 m ³ (185 Mpmp).
Largeur du plenum de côté	1,0 m
Largeur du plenum au centre	2,0 m
Nombre de ventilateurs	20
Puissance installée des ventilateurs	5 kW
Coefficient de charge moyen des moteurs des ventilateurs de séchoir	80%
Masse totale des ventilateurs	2000 kg
Masse totale des radiateurs	1600 kg
Nombre de wagonnet	24
Masse par wagonnet	700 kg
Type d'humidification	à l'eau froide ($T_{\text{eau}} = 10^{\circ}\text{C}$)

**Données spécifiques
relatives au séchoir**

Données pour le calcul de la consommation énergétique Q_i

Épaisseur des parois	1.5 mm
Épaisseur de l'isolant des murs et plafond	150 mm
Épaisseur de l'isolant de la porte	100 mm
Épaisseur des poutrelles et colombages de l'ossature	3 mm
Épaisseur de la dalle de béton du plancher	100 mm
Épaisseur du lit de gravier sous la dalle	300 mm
Température sous le lit de gravier	40 °C (été) et 30 °C (hiver)
Lestage (charge morte)	Bloc de béton de 0,250 m x 1,22 m x 2,44 m (115 lbs/pi²)
Plancher	Dalle de béton armé de 150 mm d'épaisseur assise sur un lit de gravier de 300 mm d'épaisseur
Structure du séchoir	Ossature et panneaux d'aluminium (1,5 mm) ondulés à l'extérieur et lisses à l'intérieur, avec une laine isolante de 150 mm d'épaisseur dans les parois et 100 mm dans les portes
Type d'humidification	à l'eau froide ($T_{\text{eau}} = 10^{\circ}\text{C}$)

**Données spécifiques
relatives au séchoir**

Données pour le calcul de la consommation énergétique Q_i

Étape	H _{moy} (%)	Temps (h)	T _s (°F)	T _h (°F)	T _s (°C)	T _h (°C)
Réchauffement	vert	5 (hiver) / 3 (été)	140	133	60,0	57,0
Étape 1	> 40	----	140	133	60,0	56,0
Étape 2	40 - 30	----	150	135	65.5	57.0
Étape 3	30 - 25	----	160	130	71.0	54.5
Étape 4	25 - 13	----	180	130	82.0	54.5
Étape 5	----	----	----	----	----	----
Équilibrage	----	15	180	163	82,0	76.0
Conditionnement	----	----	----	----	----	----
Refroidissement ¹	----	2	----	----	----	----

**Programme de
séchage**

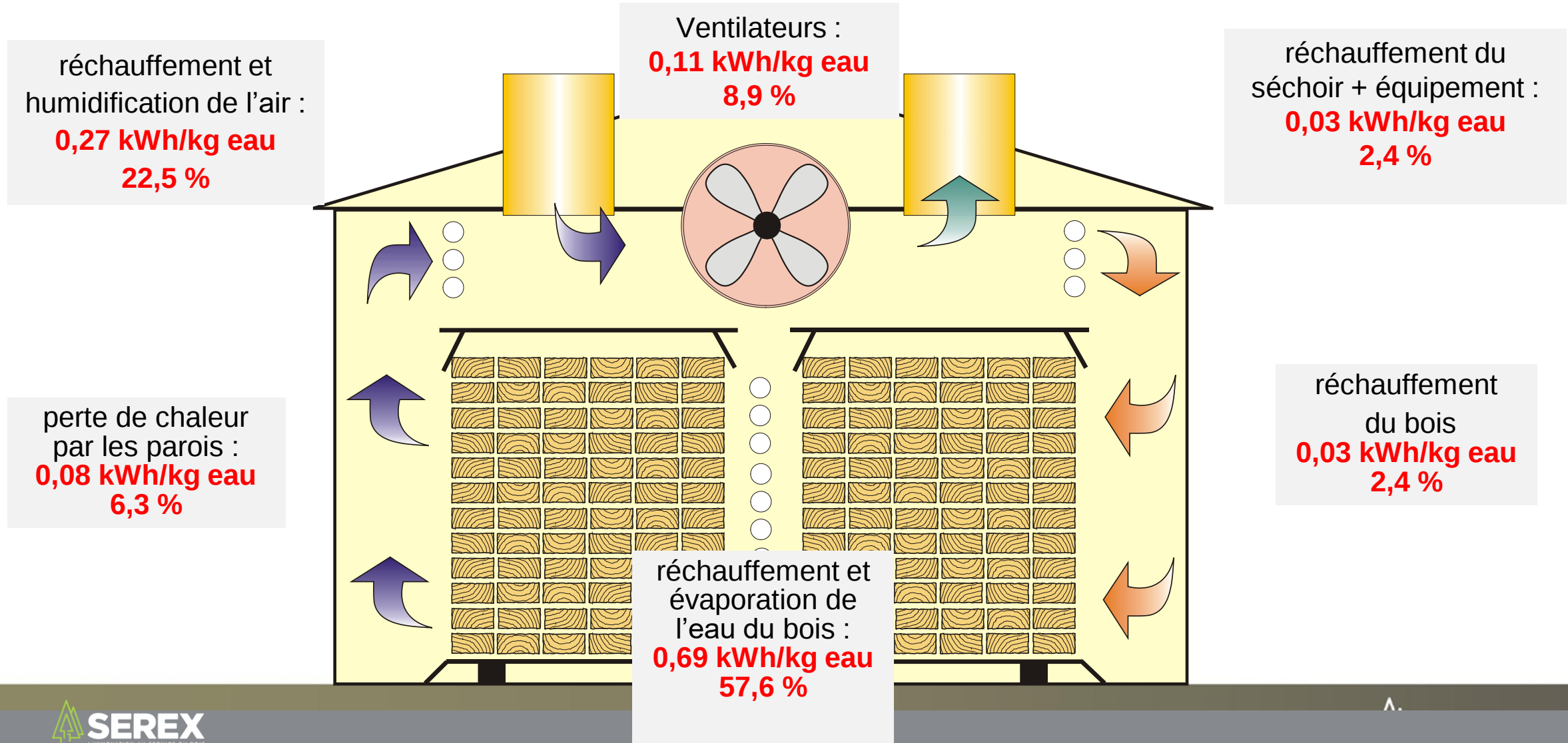
Calcul de la consommation énergétique Qi

Qi	kJ Calorifique + électrique	%	kJ Calorifique seulement	%	$\text{kJ/m}^3_{\text{app}}$	$\text{kWh/kg}_{\text{eau}}$
1	18 672 740	6.5	18 672 740	7.2	42 567	0.11
2	13 337 875	4.6	13 337 875	5.2	30 406	0.08
3	1 755 139	0.6	1 755 139	0.7	4 001	0.01
4	13 395 255	4.6	13 395 255	5.2	30 536	0.08
5	135 559 884	47.0	135 559 884	52.4	309 028	0.83
6	59 642 649	20.7	59 642 649	23.0	135 964	0.36
7	16 492 309	5.7	16 492 309	6.4	37 597	0.10
8	29 308 235	10.2	----			
Total	288 164 086	100.0	258 855 851	100	590 098	1.58
Consommation calorifique corrigée (récupération énergie électrique)						
536 648						
Consommation à la chaudière:						
	$\text{MJ/m}^3_{\text{app}}$	Btu/mpmp				
	631.4	1 412 311				

Bilan énergétique : cas du séchage de sapin (2 x 4) en Été

Calorifique : 1,09 kWh/kg (H₂O)

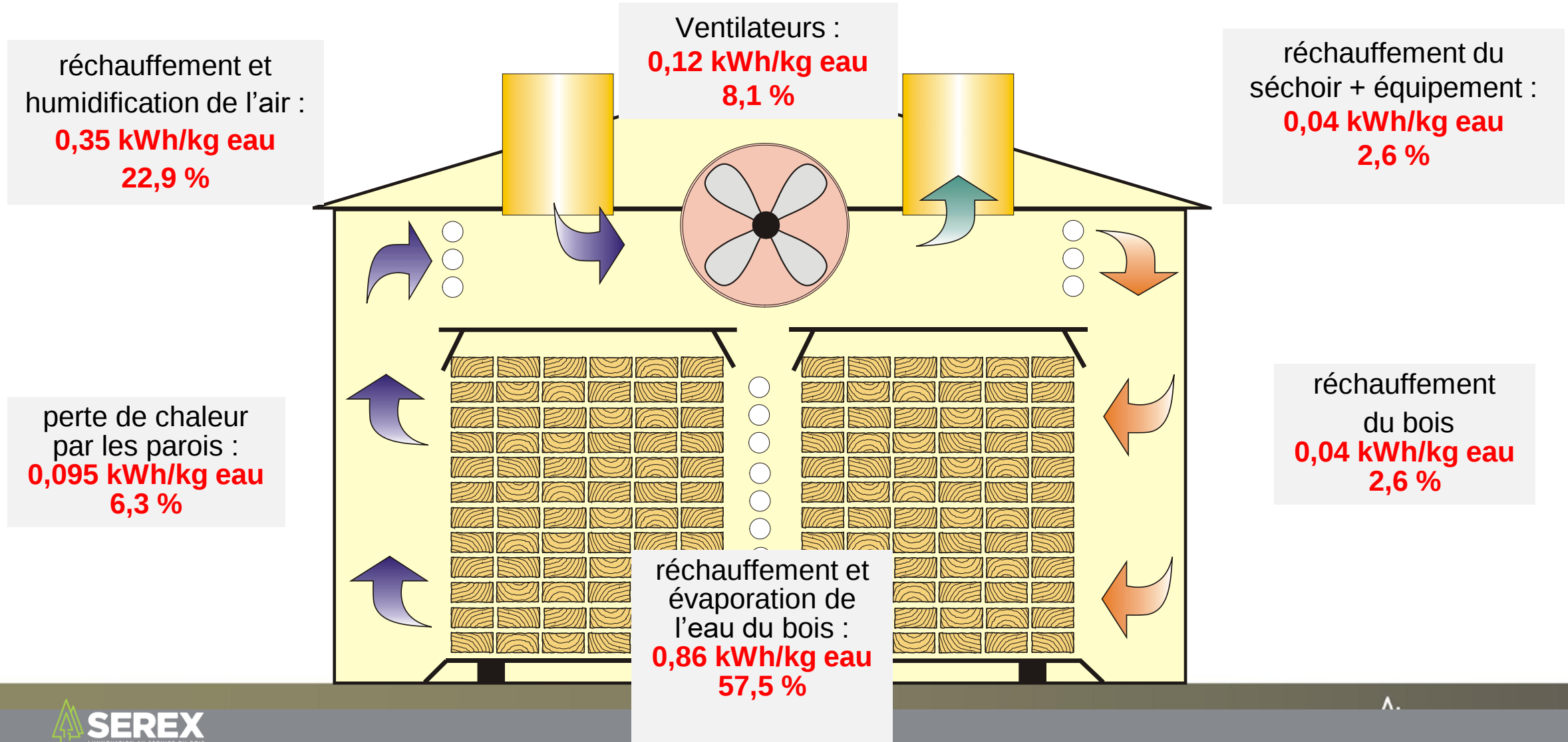
Électrique : 0,11 kWh/kg (H₂O)



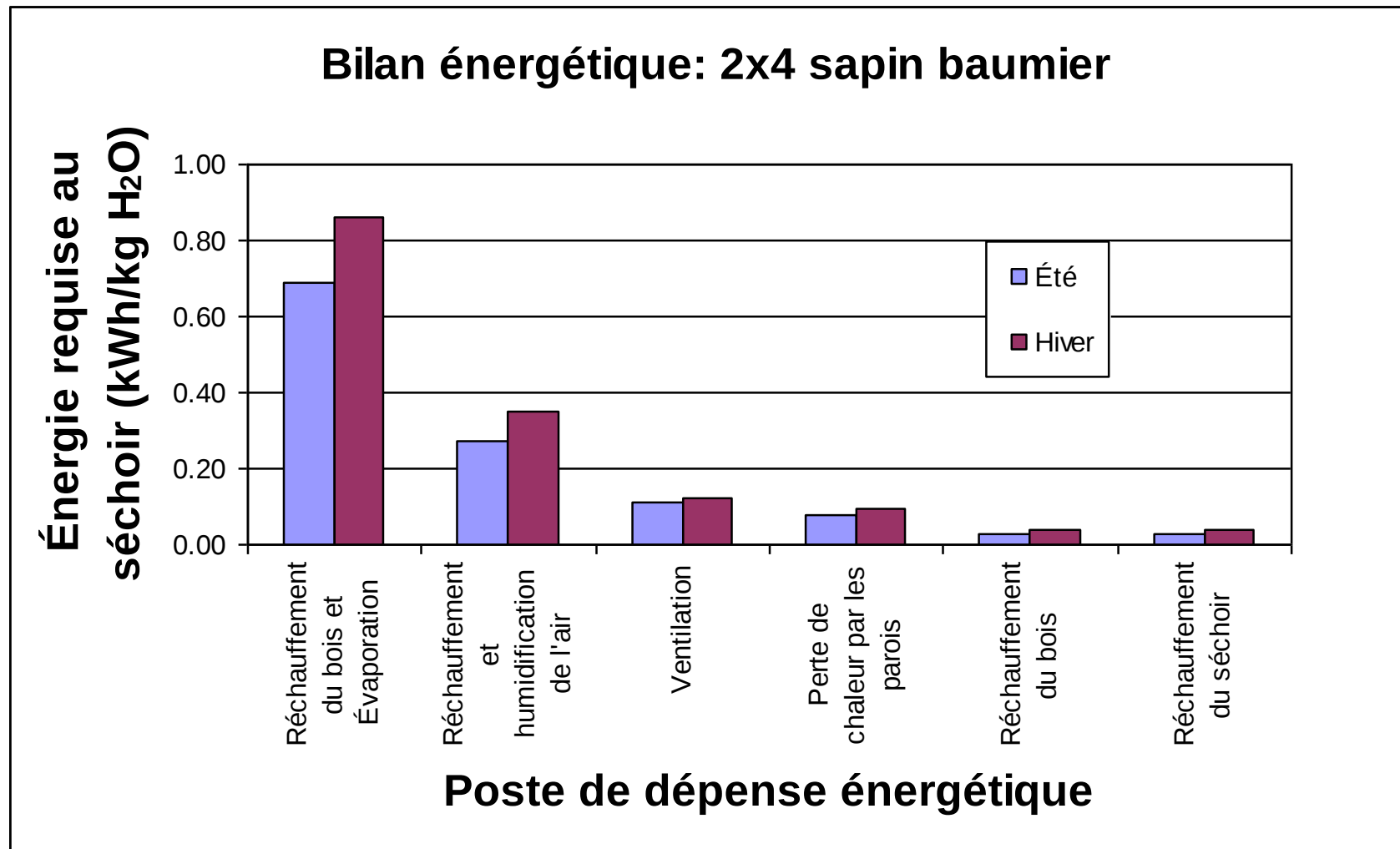
Bilan énergétique : cas du séchage de sapin (2 x 4) en Hiver

Calorifique : 1,39 kWh/kg (H₂O)

Électrique : 0,12 kWh/kg (H₂O)



Bilan énergétique : Sapin (2 x4) – comparaison été vs hiver

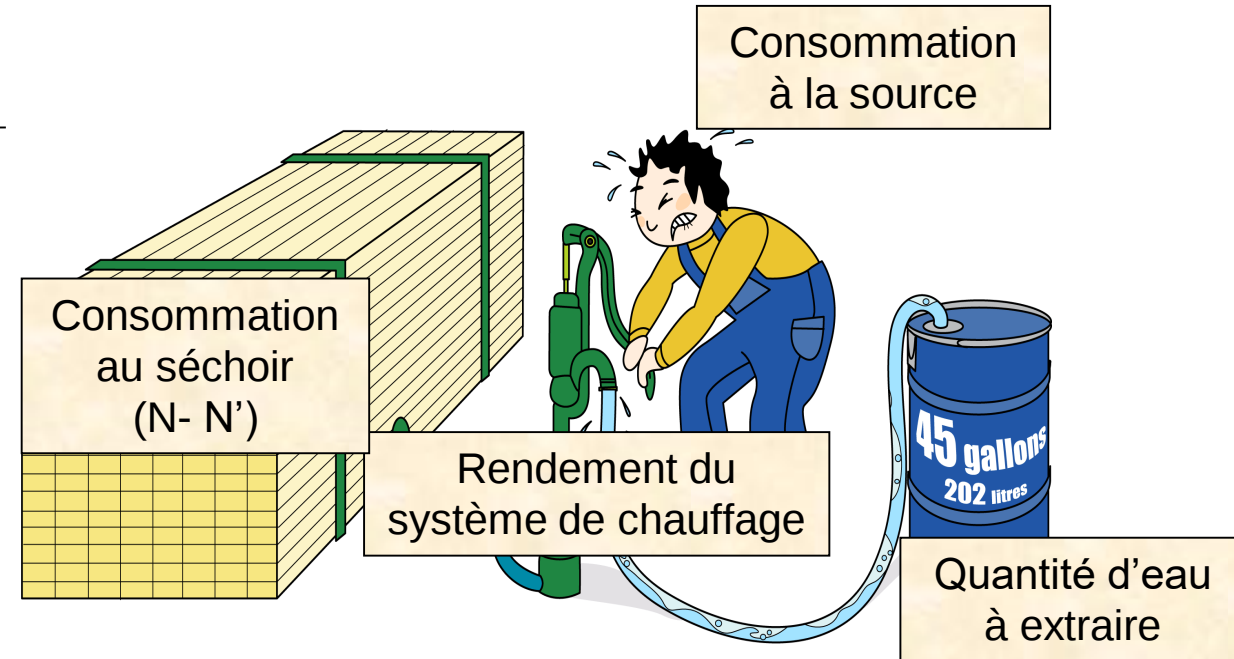


Consommation calorifique à la source

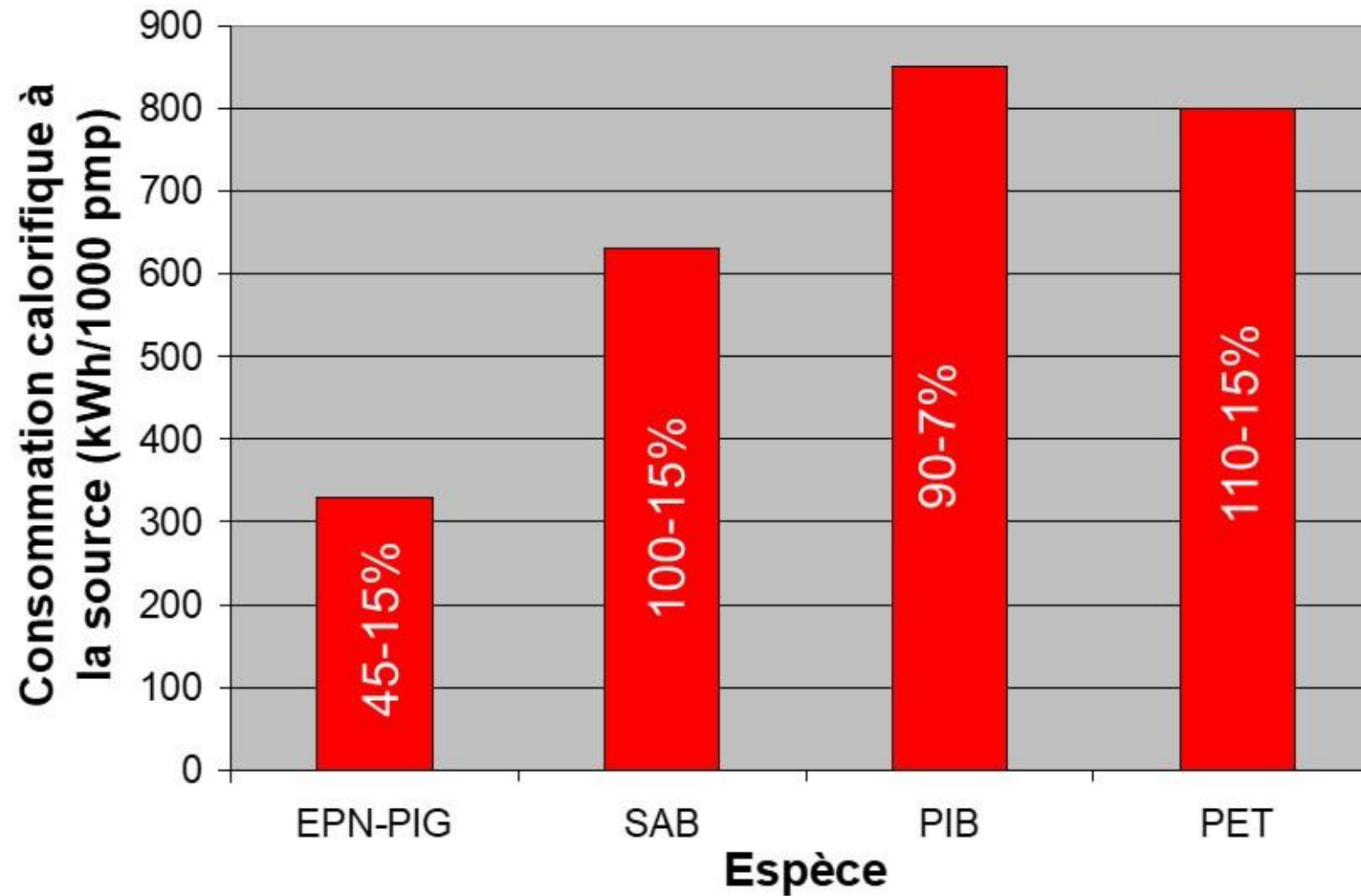
$$= \frac{\text{Quantité d'eau à extraire du bois} \times (N - N')}{\text{Rendement système de chauffage}}$$

N = consommation calorifique unitaire au séchoir

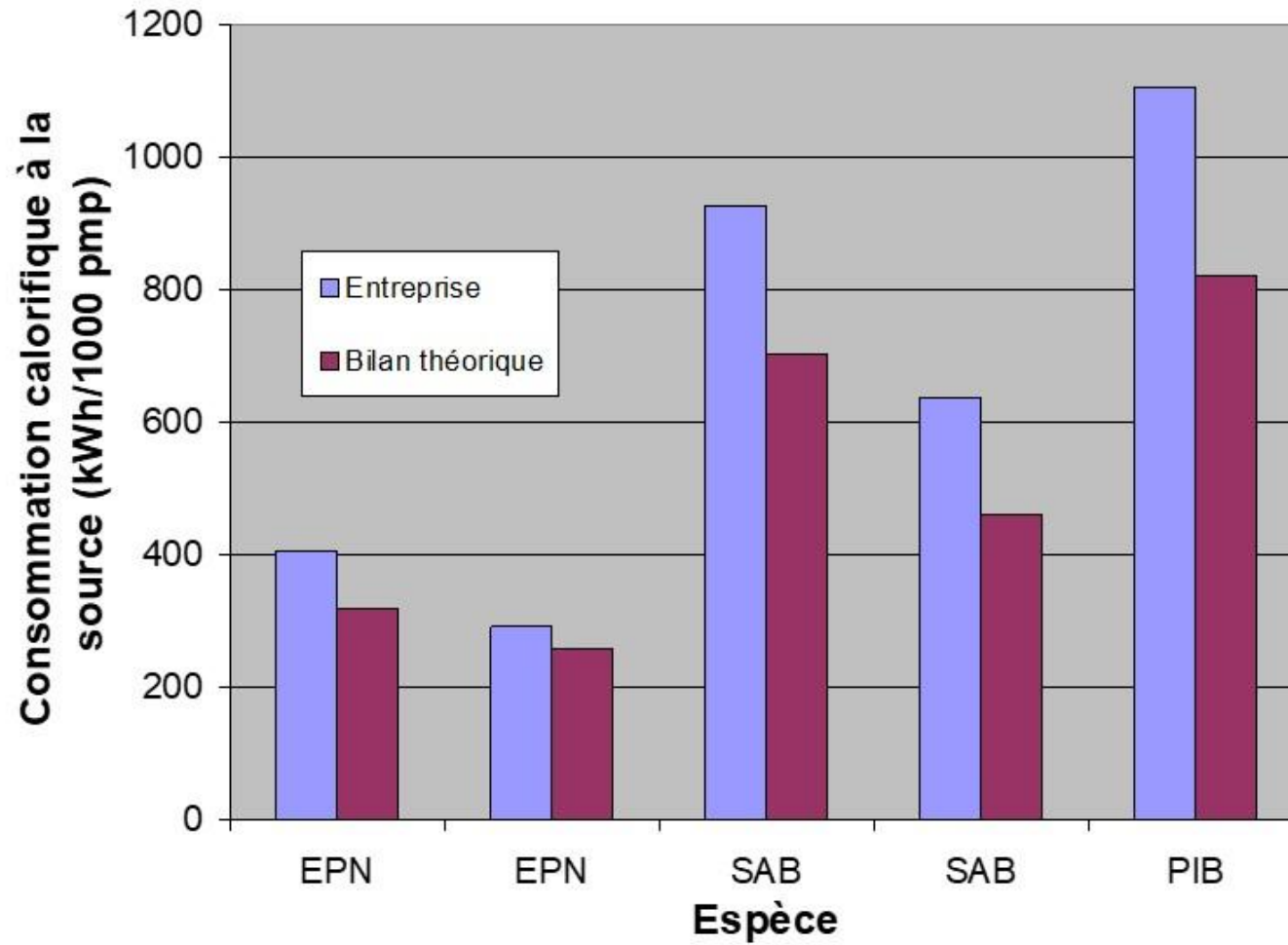
N' = consommation électrique des ventilateurs x facteur de récupération



Consommation calorifique à la source par essence (chaudière au mazout)



Bilan énergétique : Entreprise vs bilan théorique



Comparaison sources d'énergie

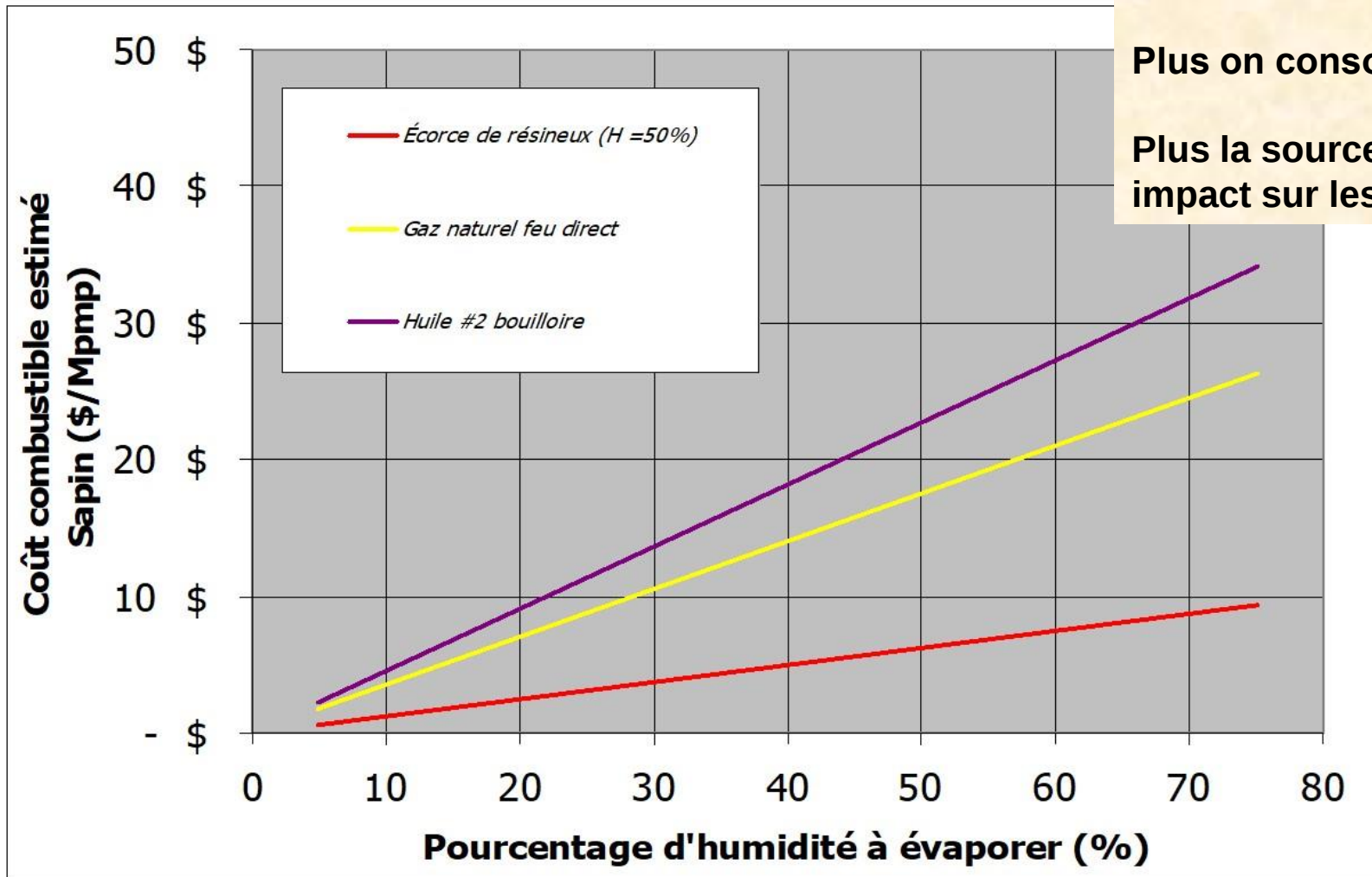
Source énergie calorifique	Écorce de résineux H ~ 50 %	Gaz naturel Feu Direct	Huile #2 Bouilloire
Pouvoir calorifique	10 – 13 MJ/kg	37 – 38 MJ/m ³	38 – 39 MJ/L
Rendement (%)	65 – 75 %	80 – 90 %	80 – 88 %
Coût approx./unité	0,03 – 0,06 \$/kg-vert	0,20 – 0,35 \$/m ³	1,10 – 1,40 \$/L
Coûts (\$/kWh)	0,015 – 0,030	0,030 – 0,055	0,090 – 0,130

Approche du bilan énergétique d'une opération de séchage

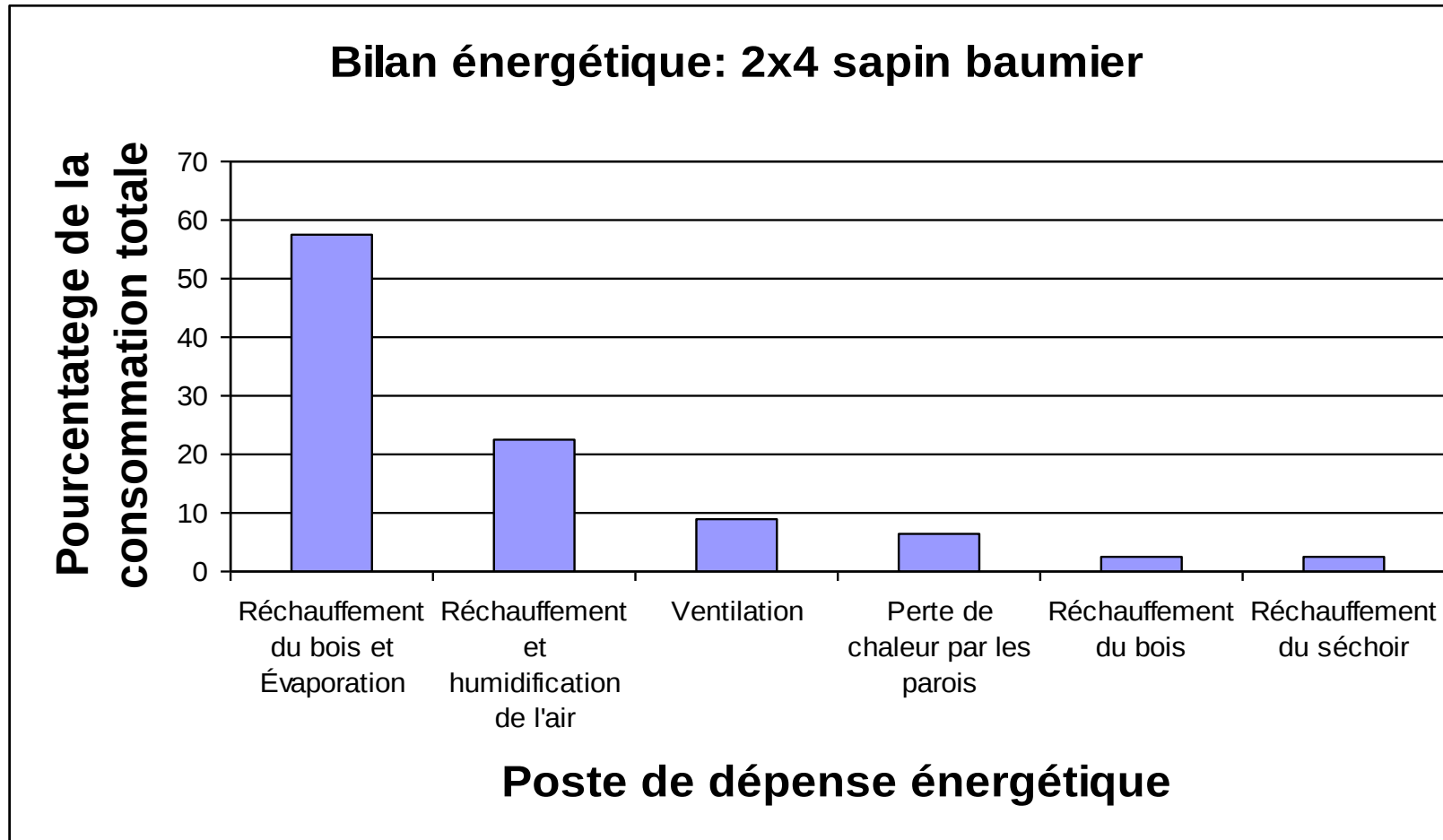
Plus il y a H₂O à extraire:

Plus on consomme de l'énergie

Plus la source et le procédé ont un impact sur les coûts de séchage



Opportunités pour réduire la consommation énergétique : Postes à favoriser ?



Opportunités pour réduire la consommation énergétique : Postes à favoriser

Postes à favoriser

- Diminuer la quantité d'eau à évaporer
- Diminuer l'énergie requise pour réchauffer l'air entrant
- Diminuer les pertes thermiques
- Diminuer l'énergie électrique

Opportunités pour réduire la consommation énergétique

Diminuer la quantité d'eau à évaporer

- ✓ Pré-séchage à l'air
- ✓ Éviter le surséchage
- ✓ Pré-triage
- ✓ Pré-rabotage

Opportunités pour réduire la consommation énergétique

Pré-séchage à l'air du sapin baumier de 100 à 50 % H (30 000 Mpmp/an)

- réduction de 375 kWh/Mpmp énergie calorifique à la source
(54,7 % ou 506 000 \$/an pour feu direct)
- réduction de 26 kWh/Mpmp énergie électrique
(42,8 % ou 50 700 \$/an)

Opportunités pour réduire la consommation énergétique

Diminuer l'énergie requise pour réchauffer l'air entrant

- ✓ Améliorer l'étanchéité du séchoir
- ✓ Moduler de façon indépendante les volets d'entrée et de sortie d'air
- ✓ Optimiser le programme de séchage
- ✓ Installer un échangeur de chaleur aux événements d'entrée et de sortie d'air
- ✓ Calibrer les sondes de température

Opportunités pour réduire la consommation énergétique

Diminuer les pertes thermiques à travers les parois

- ✓ Diminuer les temps de séchage
- ✓ Améliorer l'étanchéité des joints de panneaux pour maintenir l'isolant sec
- ✓ Poser un isolant thermique sous le plancher
- ✓ Construire des cellules en tandem

Remplacer un isolant mouillé par un isolant sec permettrait de réduire la consommation énergétique à la source d'au moins 10 %

Opportunités pour réduire la consommation énergétique

Diminuer l'énergie électrique

- ✓ Utiliser des ventilateurs à vitesse variable
- ✓ Améliorer l'aéraulique des séchoirs à l'aide de déflecteurs d'air
- ✓ Diminuer les temps de séchage

Le gain net en coût énergétique en réduisant la vitesse sous le PSF correspond à :

$$\frac{(\text{Énergie sauvée})}{(\text{différence de coût Électricité vs Énergie calorifique})}$$

BILAN ÉNERGÉTIQUE AU SÉCHOIR (bois non congelé)

Yves Fortin, professeur, Université Laval.
Tél: (418) 656-2181. Courriel: yves.fortin@stulaval.ca
Aziz Laghdir, professeur de recherche, Université Laval.
Tél: (418) 656-2181 (7476). Courriel: aziz.laghdir@stulaval.ca

AVERTISSEMENT: Cette feuille de calcul a été conçue en premier lieu pour fin d'apprentissage; elle doit être adaptée au besoin selon les caractéristiques de l'installation de séchage considérée. Pour ce faire, consulter le texte explicatif ou contacter les auteurs.

HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

Dans le but de simplifier les calculs et les entrées de données, ce bilan est basé sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices qui peuvent causer dans certains cas une sous-estimation de la consommation en énergie, notamment au niveau de l'humidification du séchoir et de la ventilation (renouvellement en air frais). Notez également que les calculs ne portent que sur le bilan énergétique au séchoir, et que l'estimation de la consommation à la chaudière (résidus humides dans cet exemple) ne donne qu'une valeur très grossière.

Données de base		Conditions moyennes du fait	
Espèce	Épinate noire	Air extérieur:	
Épaisseur réelle (mm)	43,2	température (°C)	18
Largeur réelle (mm)	95	HR (%)	60%
Épaisseur nominale (mm)	51,3	Température nominale	
Largeur nominale (mm)	102	de séchage (°C)	82
Épaisseur des baguettes (mm)	19	Excédent d'air	15%
Épaisseur entre les débits (mm)	3		
Dimensions des paquets: largeur (m)	1,22	Propriétés des matériaux	
hauteur (m)	1,22	Chaleur spécifique (kJ/kg°C)	
longueur (m)	2,44	Aluminium	0,869
Dimensions des baguettes: largeur (mm)	38	Acier	0,460
hauteur (mm)	19	Béton (10%4)	0,836
longueur (mm)	1,22	Gravier (10%4)	1,840
Nombre de rangées par paquet	20	Laine minérale	1,250
Nombre de baguettes par rangée	5	Conductivité thermique (W/m°C)	
Humidité initiale	45%	Aluminium	204
Humidité finale	13%	Acier	46
Température initiale du bois (°C)	18	Béton (10%4)	1,21
Température finale des équipements (°C)	48	par rangée	1,04
des débits (kg/m²)	410	Laine minérale	0,04
de la masse volumique (kg/m³)	410		
Nombre de paquets dans le séchoir	144	Propriétés de l'eau	
Nombre de paquets en haut	3	Chaleur spécifique (kJ/kg°C)	
Nombre d'emplacements (pour le lestage)	48	(kg/m³)	4,18
Coefficient de remplissage du séchoir (%)	100%	Masse volumique (kg/m³)	1000
Nombre de ventilateurs par séchoir	20	Propriétés de la glace	
Puissance installée des ventilateurs (kW)	5	Chaleur spécifique (kJ/kg°C)	2,00
Coefficient de charge moyen des moteurs des ventilateurs de séchoir	80%	Chaleur de fusion (kJ/kg)	333
Masse totale des ventilateurs (kg)	2000	Données calculées	
Masse totale des radiateurs (kg)	1000	Nombre de morceaux par rangée	12
Masse du lestage par pile (kg)	1670	Nombre de morceaux par paquet	240
Nombre de wagonnet	24	Volume réel de bois par paquet (m³)	2,40
Masse par wagonnet(kg)	700	hauteur (m)	6,5
Dimensions du séchoir: largeur (m)	9,0	Épaisseur des parois du séchoir (mm)	32,0
hauteur (m)	6,5	Nombre de baguettes par paquet	96
Épaisseur des parois du séchoir (mm)	1,5	Chaleur spécifique du bois (kJ/kg·°C)	1,27
Épaisseur de l'isolant des murs et plafond (mm)	150	Chaleur apparent de bois par paquet (m³)	3,05
Épaisseur de l'isolant de la porte (mm)	100		
Épaisseur des poutrelles et colombages de l'ossature (mm)	3		
Épaisseur de la dalle de béton du plancher (mm)	100		
Épaisseur du lit de gravier sous la dalle (mm)	300		
Température sous le lit de gravier (°C)	40		
Coefficient de transfert convectif de chaleur (W/m²·K): intérieur murs et plafond	45		
intérieur plancher	15		
intérieur	7		
Programme de séchage			
Étape	Ts (°C)	Th (°C)	H (%)
0	18,0	16,0	45,0%
Préchauffage	65,5	64,5	45,0%
Étape 1	60,0	56,0	5,0%
Étape 2	65,5	57,0	10,0%
Étape 3	71,0	54,5	5,0%
Étape 4	82,0	54,5	0,0%
Étape 5	82,0	54,5	0,0%
Étape 6	82,0	54,5	0,0%
Équilibre	82,0	54,5	0,0%
Conditionnement	82,0	54,5	0,0%
Reboidissement	50,0	50,0	0,0%

Formules de calcul

Q1: Réchauffement des débits, baguettes et traverses de support

$$Q_1(kJ) = \left[m_1 C_p (T_{1,fin} - T_{1,init}) + m_2 C_p (T_{2,fin} - T_{2,init}) + m_3 C_p (T_{3,fin} - T_{3,init}) \right]$$

Q2: Réchauffement du séchoir et des équipements connexes

$$Q_2(kJ) = \sum \left[m_i C_{pi} (T_{i,fin} - T_{i,init}) \right]$$

Paroi extérieure (aluminium)	6700
Paroi intérieure + ossature (aluminium)	100055
Isolant (laine minérale)	63070
Dalle de béton	1619877
Lit de gravier	2280262
Blocs de lestage (béton)	2278468
Radiateurs (acier)	15640
Ventilateurs (aluminium)	9900
Rails+ wagonnets+ plomberie (acier)	262792
Total	6705708

Q3: Forces de rétention

$$Q_3(kJ) = m_4 \int_{T_{4,init}}^{T_{4,fin}} h_{4,liq} dT$$

Chaleur int. de sorption	12,4
Total Q3	1759139

Q4: Réchauffement de l'eau résiduelle du bois après séchage

$$Q_4(kJ) = \left[m_5 \frac{H_5}{100} C_{pw} (T_{5,fin} - T_{5,init}) \right] + \left[m_6 \frac{H_6}{100} C_{pw} (T_{6,fin} - T_{6,init}) \right]$$

$$Q_4(kJ) = \left[m_5 \frac{H_5}{100} C_{pw} (T_{5,fin} - 0) \right] + \left[m_6 \frac{H_6}{100} C_{pw} (T_{6,fin} - 0) \right]$$

Total Q4	5025905
----------	---------

Q5: Réchauffement et évaporation de l'eau extraite des débits

$$Q_5(kJ) = \sum \left[m_i \frac{\Delta H_i}{100} (C_{pw} (T_{i,fin} - T_{i,init}) + h_{v,i}) \right]$$

$$Q_5(kJ) = \sum \left[m_i \frac{\Delta H_i}{100} (C_{pw} (0 - T_{i,init}) + h_{v,i}) + m_i \frac{\Delta H_i}{100} (C_{pw} (T_{i,fin} - 0) + h_{v,i}) \right]$$

Étape	Ts(°C)	delta H (%)	h _{vap} (kJ/kg _{eau})	Q5(i) (kJ)
0	18,0	0,0%		0,00
Préchauffage	65,5	0,0%	2344,9	0,00
Étape 1	60,0	0,0%	2535,2	0,00
Étape 2	65,5	5,0%	2360,9	17594793,35
Étape 3	71,0	5,0%	2344,9	36089060,35
Étape 4	82,0	12,0%	2297,0	18094276,78
Étape 5	82,0	0,0%	2297,0	436955048,09
Étape 6	82,0	0,0%	2297,0	0,00
Équilibre	82,0	0,0%	2297,0	0,00
Conditionnement	82,0	0,0%	2297,0	0,00
Reboidissement	50,0	0,0%	2297,0	0,00

Total Q5	115943158
----------	-----------

BILAN ÉNERGÉTIQUE AU SÉCHOIR (bois non congelé)

Yves Fortin, professeur, Université Laval.
Tél: (418) 656-2181. Courriel: yves.fortin@stulaval.ca
Aziz Laghdir, professeur de recherche, Université Laval.
Tél: (418) 656-2181 (7476). Courriel: aziz.laghdir@stulaval.ca

AVERTISSEMENT: Cette feuille de calcul a été conçue en premier lieu pour fin d'apprentissage; elle doit être adaptée au besoin selon les caractéristiques de l'installation de séchage considérée. Pour ce faire, consulter le texte explicatif ou contacter les auteurs.

HYPOTHÈSE DE TRAVAIL

Dans le but de simplifier les calculs et les entrées de données, ce bilan est basé sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices qui peuvent causer dans certains cas une sous-estimation de la consommation en énergie, notamment au niveau de l'humidification du séchoir et de la ventilation (renouvellement en air frais). Notez également que les calculs ne portent que sur le bilan énergétique au séchoir, et que l'estimation de la consommation à la chaudière (résidus humides dans cet exemple) ne donne qu'une valeur très grossière.

Q6: Réchauffement de l'air de séchage et énergie pour l'humidification de l'excédent d'air

Q6a: Réchauffement de la masse minimale théorique de l'air de séchage

$$Q_{6a}(kJ) = \sum \left[\frac{m_i \Delta H_i}{100 (h_{air,init} - h_{air,fin})} C_{pa} (T_{i,fin} - T_{i,init}) \right]$$

P ₁ (entrée) (kPa)	2,0343586	p ₁ (3)							
P ₁ (sortie) (kPa)	1,2206151								
w ₁ (entrée) (kg/kg)	0,0075862								
Étape	Ts (°C)	Th (°C)	delta H (%)	P ₁ (T ₁) (kPa)	P ₁ (T ₁) (kPa)	HR(sortie) (%)	P ₁ (sortie) (kPa)	w(sortie)	Q6a(i) (kJ)
0	18,0								
Préchauffage	65,5	64,5	0,0%	25,6	24,4	95,4%	24,4	0,197	0,0
Étape0	0,0	0,0	0,0%	0,6	0,6	100,0%	0,6	0,004	0,0
Étape 1	60,0	56,0	5,0%	19,9	16,5	81,5%	16,2	0,119	2682407,0
Étape 2	65,5	57,0	10,0%	25,6	17,3	65,4%	16,7	0,123	5936140
Étape 3	71,0	54,5	5,0%	32,5	15,4	43,8%	14,3	0,102	3989210
Étape 4	82,0	54,5	12,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,096	12563743
Étape 5	82,0	54,5	0,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,096	0
Étape 6	82,0	54,5	0,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,096	0
Équilibre	82,0	77,0	0,0%	51,3	41,9	81,0%	41,5	0,433	0,0
Conditionnement	82,0	77,0	0,0%	51,3	41,9	81,0%	41,5	0,433	0,0
Reboidissement	50,0								
									Total Q6a = 24861502

Q6b: Réchauffement de la vapeur d'eau contenue dans la masse minimale théorique de l'air de séchage

$$Q_{6b}(kJ) = \sum \left[\frac{m_i \Delta H_i}{100 (h_{air,init} - h_{air,fin})} h_{v,i} C_{pw} (T_{i,fin} - T_{i,init}) \right]$$

P ₁ (entrée) (kPa)	2,0343586	p ₁ (3)	
P ₁ (sortie) (kPa)	1,2206151		
w ₁ (entrée) (kg/kg)	0,0075982		

Étape	Ts (°C)	Th (°C)	delta H (%)	P ₁ (T ₁) (kPa)	P ₁ (T ₁) (kPa)	HR(sortie) (%)	P ₁ (sortie) (kPa)	w(sortie) (kg/kg)	Q6b(i) (kJ)
0	0,0	0,0	0,0%	25,6	24,4	95,4%	24,4	0,2	0,0
Préchauffage	65,5	64,5	0,0%	19,9	16,5	100,0%	16,0	0,0	0,0
Étape 1	60,0	56,0	5,0%	19,9	16,5	81,5%	16,2	0,1	391724
Étape 2	65,5	57,0	10,0%	25,6	17,3	65,4%	16,7	0,1	85227,7
Étape 3	71,0	54,5	5,0%	32,5	15,4	43,8%	14,3	0,1	58256,2
Étape 4	82,0	54,5	12,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,1	180407,2
Étape 5	82,0	54,5	0,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,1	0,0
Étape 6	82,0	54,5	0,0%	51,3	15,4	26,3%	13,5	0,1	0,0
Équilibre	82,0	77,0	0,0%	51,3	41,9	81,0%	41,5	0,4	0,0
Conditionnement	82,0	77,0	0,0%	51,3	41,9	81,0%	41,5	0,4	0,0
Reboidissement	50,0	50,0	0,0%	51,3	41,9	81,0%	41,5	0,4	0,0
Total Q6b									963094

Q6c: Réchauffement de l'excédent d'air

$$Q_{6c}(kJ) = E_{exc} (Q_{6a} + Q_{6b})$$

Q6d: Réchauffement et vaporisation de l'eau d'humidification

$$Q_{6d}(kJ) = \sum \left[\frac{m_i \Delta H_i}{100} E_{exc} (C_{pw} (T_{i,fin} - T_{i,init}) + h_{v,i}) \right]$$

Étape	Ts(°C)	delta H (%)	h _{vap} (kJ/kg _{eau})	Q6d(i) (kJ)
0	18,0	0,0%		0,00
Préchauffage	65,5	0,0%	2344,9	0,00
Étape 1	60,0	0,0%	2535,2	0,00
Étape 2	65,5	5,0%	2360,9	2748074
Étape 3	71,0	5,0%	2344,9	5484532
Étape 4	82,0	12,0%	2297,0	2748074
Étape 5	82,0	0,0%	2297,0	6655164
Étape 6	82,0	0,0%	2297,0	0
Équilibre	82,0	0,0%	2297,0	0
Conditionnement	82,0	0,0%	2297,0	0
Reboidissement	50,0	0,0%	2297,0	0

Total Q6d	17604227
-----------	----------

Q7: Chaleur perdue à travers les parois et le plancher

Calcul des résistances thermiques

$$R_{tot} = \left[\frac{1}{h_{int}} + \sum \frac{l_j}{k_j} + \frac{1}{h_{ext}} \right]$$

Calcul des débits et pertes totales de chaleur

$$Q_7(kJ) = \sum [Q_{6d,i} t_{0,i} 3,6]$$

$$Q_{6d,i}(W) = \frac{A_i \Delta T_{6d,i}}{R_{tot,i}}$$

Étape	Section	Ts (°C)	A _j (m²)	q _i (W)	Temps (h)	delta t (h)	Q ₇ (kJ)
0		18,0		0,0	0,0		
Préchauffage	Murs et plafond	65,5	762,5	9251	3,0	3	99911
Étape 1	Portes	65,5	58,5	1043	3,0	3	11291
Préchauffage	Plancher	65,5	288	16776	3,0	3	181173
Étape 2	Murs et plafond	0,0	762,5	-3506	3,0	0	0
Étape 3	Portes	0,0	58,5	-395	3,0	0	0
Étape 4	Plancher	0,0	288	-26315	3,0	0	0
Étapes 1,2,3	Murs et plafond	65,5	762,5	9251	9,0	6	139823
Étapes 4,5,6	Plancher	65,5	58,5	1043	9,0	6	22521
Étapes 4,5,6	Murs et plafond	82,0	762,5	12465	22,5	14	605779
Étapes 4,5,6	Portes	82,0	58,5	1405	22,5	14	68275
Étapes 4,5,6	Plancher	82,0	288	27631	22,5	14	134285
Équilibre	Murs et plafond	82,0	762,5	12465	84,5	62	2782094
Équilibre	Portes	82,0	58,5	1405	84,5	62	133568
Équilibre	Plancher	82,0	288	27631	84,5	62	5187188
Conditionnement	Murs et plafond	82,0	762,5	12465	84,5	0	0
Conditionnement	Portes	82,0	58,5	1405	84,5	0	0
Conditionnement	Plancher	82,0	288	27631	84,5	0	0
0		50,0					
Total Q7							12156801

Calcul des températures dans le plancher pour Ts(max)

$$q \text{ (W / m}^2\text{)} = \frac{\Delta T}{R_{tot}}$$

Calcul de la température entre la dalle de béton et le gravier:

q₁(max)

q₂(max)

Calcul de la température de la paroi extérieure

q₁(max)

q₂(max)

MERCI !



TRANSFORMATION
DU BOIS

